

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

V zbirki je izvirna različica izdajatelja.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

University
of Ljubljana
Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is a publisher's version PDF file.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Šantl, S., Alterach, J., Kozelj, D. 2012. Razvoj informacijskega orodja za ugotavljanje učinkovitega hidroenergetskega potenciala = Development of an informatics tool for efficient hydropower potential determination. Acta hydrotechnica 25/42:19-30.

<ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a42ss.pdf>
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5194/>

Arhivirano/Archived: 07-07-2015

UDK/UDC: 519.6:556:627.8

Prejeto/Received: 03. 04. 2012

Kratki znanstveni prispevek – *Short scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 13. 09. 2012

**RAZVOJ INFORMACIJSKEGA ORODJA ZA UGOTAVLJANJE UČINKOVITEGA
HIDROENERGETSKEGA POTENCIALA**
**DEVELOPMENT OF AN INFORMATICS TOOL FOR EFFICIENT HYDROPOWER
POTENTIAL DETERMINATION**

Sašo Šantl^{1,*}, Julio Alterach², Daniel Kozelj¹

¹ Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Hajdrihova 28, 1000 Ljubljana

² Ricerca sul Sistema Energetico RSE SpA, via Pastrengo, 9 - 24068 Seriate (BG), Italia

Izvleček

Ugotovitev razpoložljivega hidroenergetskega potenciala določenega porečja ali rečnega odseka zahteva izvedbo ustreznega postopka, od pridobivanja potrebnih podatkov, na primer podatkov o topografiji in hidrologiji, do določitve različnih parametrov, kot je na primer učinkovitost hidroenergetske izrabe vodnega potenciala. Nivo uporabe orodja za podporo odločanju je povezan z natančnostjo izvedbe postopka. Še do nedavnega so inženirji s pristojnih strokovnih področij hidroenergetski potencial določevali z ročnim računanjem, danes pa se z razvojem informacijske tehnologije ta postopek lahko popolnoma avtomatizira, kar predstavlja občutni časovni prihranek. Ne glede na slednje pa je treba pri vzpostavitvi modela ustrezno izvesti postopek verifikacije vhodnih podatkov, na podlagi česar se vhodni podatki lahko ustrezno popravijo oziroma se lahko tudi ugotovi, da so vhodni podatki (na primer uradna evidenca o rečni mreži) netočni. Članek povzema osnovne module in razvoj informacijskega orodja, čigar testiranje na stvarnem porečju zagotavlja ustrezne povratne informacije pri njegovem razvoju. Predstavljeno informacijsko orodje temelji na prostorskem informacijskem sistemu in je razvito v sklopu projekta SEE Hydropower. Testiranje orodja in interpretacija rezultatov sta bila izvedena in verificirana tudi na stvarnih pilotnih območjih. Namen razvojnih aktivnosti je zagotoviti ustrezno podatkovno podporo procesom odločanja na strateškem nivoju in pri med-sektorskem usklajevanju.

Ključne besede: hidroenergetski potencial, geografsko informacijsko orodje, rečna mreža, hidrologija, učinkovitost proizvodnje električne energije, verifikacija, pilotna študija.

Abstract

The process of determining the residual hydropower potential of a certain river catchment or reach requires a sequence of methods from data acquisition (topography, hydrology etc.) to definition of different parameters such as hydropower efficiency. The level of detail of this process depends on the required level of decision-making. Until relatively recently, the determination of residual hydropower potential was performed manually. Nowadays with the developments in information technology, this process can be fully automated with significant time efficiency. Nonetheless, when a model is established, the process of input data

* Stik / Correspondence: saso.santl@fgg.uni-lj.si

© Šantl S. et al.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [Creative Commons Attribution 4.0 Licence](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), ki dovoljuje neomejeno rabo, širjenje in reprodukcijo v kateremkoli mediju pod pogojem, da so navedeni avtorji in vir izvirnega besedila.

© Šantl S. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 Licence](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

verification must still be performed, which in some cases requires additional input data corrections. Furthermore, it can sometimes occur that original data, e.g. official data on river network, needs to be corrected. The article gives insight into the main steps and development of an informatics tool where the process of testing on real cases provides a good feedback to the developer. The presented tool, based on geographic information system, was developed within the project SEE Hydropower and it is estimated it will provide efficient support to the decision-making process at strategic level where multi-sector objectives are harmonized. Testing of the developed tool and result interpretation were performed and verified on real case study areas.

Keywords: hydropower potential, geographic information tool, river network, hydrology, electricity production efficiency, verification, pilot case study.

1. Uvod

Avtomatizacije postopkov za ugotavljanje in določanje hidroenergetskega potenciala, predvsem preostalega in učinkovito izkoristljivega, ki bi temeljila predvsem na obstoječih geografsko informacijskih sistemih, so bile eden od ciljev evropskega projekta SEE Hydropower (SEE-H), ki je sofinanciran iz programa South East Europe (SEE). Pri projektu sodeluje več držav, ki so zastopane z interesnimi javnimi upravami in agencijami ter raziskovalnimi ustanovami. Iz Slovenije pri projektu sodeluje Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo – Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem ter Ministrstvo za okolje in prostor kot najbolj zainteresiran javni organ, da se zadevno področje ustrezno preveri in uredi.

Teoretična izhodišča za razvoj takega orodja so bila do določene stopnje predhodno že raziskana, zlasti za nivo manjše natančnosti in uporabo na območju Italije (Alterach et al., 2008a in 2008b). Zato se je pri projektu SEE-H predvsem raziskalo področje uporabnosti orodja pri večji natančnosti vhodnih podatkov, posodobitev glede optimizacijskih postopkov in preveritev določanja vhodnih parametrov glede na posebnosti posameznih partnerskih držav. Slovenska posebnost pri določanju vhodnih podatkov glede plačila za pravico za rabo vode (koncesnina) je v tem, da se le-ta plačuje v deležu glede na prodano električno energijo, v večini ostalih primerljivih držav pa je višina koncesnine vezana na instalirano moč elektrarne oziroma hidroenergetskega sistema.

Pri analizi hidroenergetskih potencialov v prvem koraku praviloma govorimo o bruto potencialu, to je potencial, ki upošteva vso izdatnost in višinski padec izbranega vodotoka. Ker pa obstajajo tehnične omejitve (zajem vse vode, izgube in izkoristki objektov in naprav, obdobje vzdrževanja itd.), se za določanje proizvodnje električne energije uporablja tehnično izkoristljiv potencial oziroma krajše tehnični potencial. Tehnični potencial upošteva stanje tehnike in tehničnih rešitev, ki so na razpolago za čim boljše izkoriščanje bruto potenciala. Ker pa določena količina vode ni več na razpolago in je treba upoštevati tudi okoljske zahteve glede ohranjanja ekološko sprejemljivega pretoka (Q_{es}), je smiselno govoriti o razpoložljivem tehničnem potencialu. Pri določanju razpoložljivega tehničnega potenciala je treba dodatno upoštevati tudi izločitev rečnih odsekov, kjer je hidroenergetska raba prepovedana. V skladu z veljavnim Načrtom upravljanja voda so to rečni odseki, kjer velja pravni režim referenčnih razmer, pomembnih za določitev tipa površinske vode (t.i. referenčna območja).

Orodje za oceno hidroenergetskega potenciala imenovano VapIdroAste, je razdeljeno v dve zaporedni fazi. Prva faza je namenjena določitvi razpoložljivega tehničnega potenciala po posameznih obravnavanih vodotokih ali njihovih izbranih odsekih, v drugi fazi pa se preverja in določi tudi ekonomsko upravičen potencial, ki je podlaga za ugotovitev možnosti ali uspešnosti izvedbe objektov za proizvodnjo električne energije.

Prva faza zahteva izvedbo priprave vhodnih podatkov pred samo analizo in prikazom končnih rezultatov:

- vzpostavitev rečne mreže s podatki o nadmorski višini na podlagi digitalnega modela terena,
- ugotovitev razpoložljivih količin vode na podlagi hidroloških podatkov, obstoječi rabi vode, zahtev glede ohranjanja Q_{es} in drugih omejitev glede rabe vode in
- določitev hidravličnih parametrov in parametrov izkoristkov za objekte in naprave hidroelektrarn.

Ne glede na stanje tehnike in možnosti tehničnega izkoriščanja pa mora biti morebitna izvedba hidroenergetske proizvodnje preverjena tudi z vidika investicijske upravičenosti. V tem koraku praviloma govorimo o določitvi ekonomsko upravičenega potenciala (potencial s pozitivnimi ekonomskimi učinki), ki se določi na podlagi razpoložljivega tehničnega potenciala in se ovrednoti na podlagi kazalnikov učinkov projekta, kot je na primer določanje količnika donosnosti (ang. cost/benefit ratio) ali neto sedanje vrednosti (NPV) (Evropska komisija, 2002). To je druga faza analize, s katero se določa ekonomsko upravičen potencial, zahteva pa pripravo naslednjih vhodnih podatkov:

- določitev parametrov za ustrezen izračun stroškov investicije (odvisnost cene investicije od moči elektrarne, dolžine cevovoda, velikosti vodozbirnega porečja ipd.) in
- stroškov in prihodkov v fazi obratovanja in vzdrževanja (amortizacijska doba, stroški obratovanja, doba zagotovljene odkupne cene elektrike, tržna odkupna cena elektrike ipd.).

Razvito in vzpostavljeno orodje je ustrezna podlaga za določanje hidroenergetskega potenciala na slovenskih rekah na nivoju strateškega odločanja oziroma največ do faze priprave Idejne zasnove kot podlage za pričetek prostorskega načrtovanja. Podrobnejše načrtovanje hidroenergetskih objektov zahteva natančnejšo prostorsko preveritev zlasti hidromorfoloških razmer ter medresorsko usklajitev. Pri tem je treba

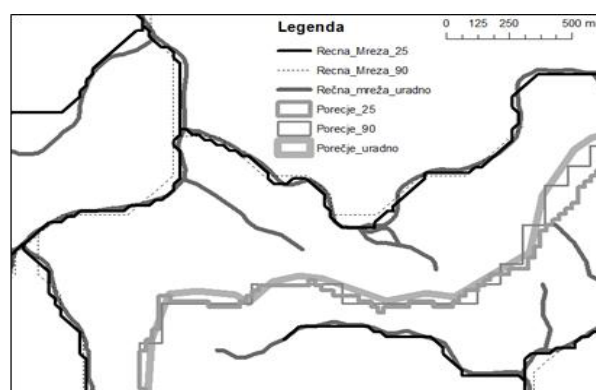
pridobiti natančnejše podatke in izvesti modeliranje, kar je uveljavljena praksa pri načrtovanju večjih hidroenergetskih objektov (Rak et al., 2010).

V nadaljevanju bodo podrobneje predstavljena osnovna teoretična izhodišča za izvedbo prve faze, to je določitev razpoložljivega tehničnega potenciala. Za drugo fazo, to je ocena obsega ekonomsko upravičenega potenciala, pa bodo podana le osnovna izhodišča in ugotovitve ter prikazan končni rezultat na aplikativnem primeru.

2. Teoretična izhodišča

2.1 Vzpostavitev rečne mreže in prispevnih območij

Rečna mreža in prispevna območja se določijo z orodjem VapidoAste, ki je kot GIS orodje vezano na uporabo obstoječega ArcGIS orodja in njegovih razvitih algoritmov. Algoritmi za vzpostavitev rečne mreže in prispevnih območij temeljijo na več teoretičnih pristopih (Tarboton et al., 1991, Maidment, 2002), pri katerih se kot vhodni podatek pripravi rastrski digitalni model terena (DMT). Z orodjem lahko rečno mrežo generiramo z želeno podrobnostjo (izris števila pritokov in podaljševanje v povirje) in določimo število generiranih podporečij.



Slika 1: Primerjava uradnih podatkov z izračunanimi podatki o rečni mreži in prispevnem območju za dve različni velikosti rastrskih celic DMT.

Figure 1: Comparison of official data with calculated data on river network and tributary area based on two different raster cell sizes of the Digital Terrain Model.

Slika 1 prikazuje primerjavo med uradnimi podatki o rečni mreži in prispevnem območju ter rezultati dveh primerov upoštevanega DMT, prvega z velikostjo celic 25 m, drugega pa z velikostjo celic 90 m.

Razvidno je, da rezultati izkazujejo ujemanje z uradnimi podatki. Natančnost ujemanja vzpostavljenih rečne mreže in podporečij (ter tudi kasnejših rezultatov analize) ni toliko odvisna od velikosti celic upoštevanega DMT, kot pravilnosti vhodnih podatkov.

2.2 Vzpostavitev podatkov o razpoložljivih pretokih

Za analizo in določanje potencialnih lokacij za hidroenergetsko rabo vode na nivoju vodotokov so podatki o razpoložljivi vodi bistveni. Pri tem je treba pridobiti in v model vnesti naslednje podatke:

- statistični pretok (srednji letni pretok; sQ_s) vsaj v eni točki v analiziranem odseku,
- količine odvzete vode (praviloma v skladu s podeljenimi vodnimi pravicami) in v primeru povratnih odvzemov tudi količine vrnjene vode z natančno lokacijo odvzemov in izpustov vzdolž analiziranega vodotoka.

Na Sliki 2 je prikazana konceptualna shema računskega in interpolacijskega postopka določanja razpoložljivih količin vode vzdolž analiziranega vodotoka (Alterach et al., 2008b; Šantl, 2011) v posameznih prerezih vzdolž analiziranega vodotoka. Prikazan je primer, ko se v model vnese naravni merjen pretok na določeni točki analiziranega odseka. Zadnji korak določitve razpoložljivega pretoka je pomemben pri analizi derivacijskih tipov elektrarn, saj je treba pri analizirani projektni dolžini derivacije paziti na morebitne dolvodne rabe vode.

Pri vzpostavljanju podporečij v prvem koraku, opisanem v prejšnjem podpoglavju, njihovo število določimo glede na želeno natančnost. Slednje je pomembno, saj se vnos merjenih pretokov in rabe vode »veže« na posamezno podporečje in je kasnejša interpolacija pretokov v koraku $\Delta x = 50$ m lahko premalo natančno interpretirana. Torej, če želimo pridobiti rezultate z večjo natančnostjo, je

treba v analiziranem odseku vodotoka vzpostaviti večje število podporečij.

Za dodatno ilustracijo je na Sliki 3 prikazan shematski prikaz odseka teoretičnega vodotoka, kjer se po vzpostavitvi rečne mreže in podporečij, vnosu pretokov analize (merjenih ali naravnih) in obstoječih odvzemov in izpustov vode (qi) za vsako točko x ($\Delta x = 50$ m) določi razpoložljivi pretok (točke po vodotoku).

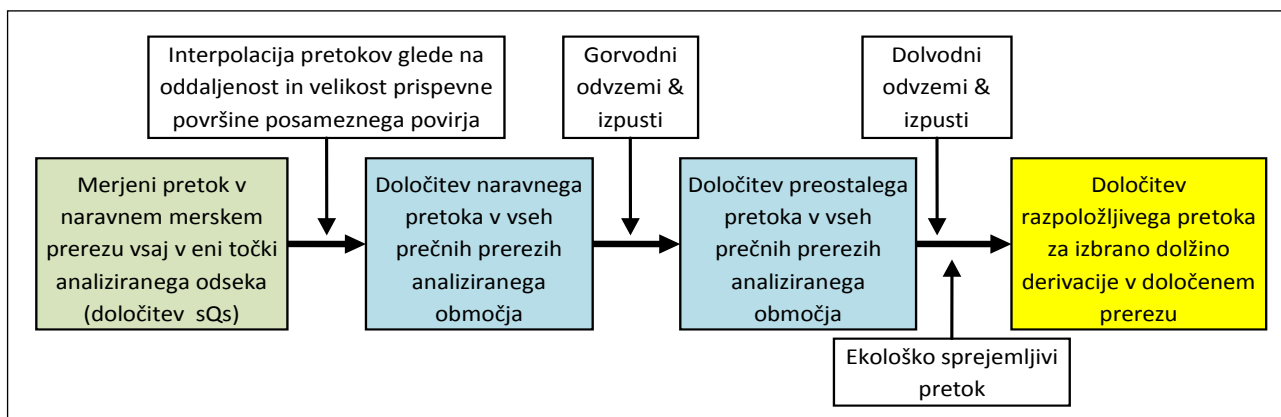
Na Sliki 3 je prikazano tudi, kako se v vsaki točki x določi razpoložljiv pretok. Ker se razpoložljiv pretok vzdolž analiziranega odseka vodotoka zaradi odvzemov in izpustov spreminja, je pri nadaljnji analizi razpoložljivi pretok v točki x odvisen tudi od izbrane dolžine L , ki predstavlja dolžino derivacije (razdalja med odvzemom in povratnim izpustom hidroelektrarne). Razpoložljiv oziroma projektiran pretok za odvzem v določenem prerezu x se tako določi z najmanjšo vrednostjo razpoložljive vode v celotni izbrani dolžini L , kakor prikazuje naslednja enačba:

$$Q_{HE}(x, L) = \min_{[s=0, L]} (Q_{max}(s)) \quad (1)$$

kjer je Q_{HE} pretok, ki je možen za hidroenergetsko rabo, $Q_{max}(s)$ pa največji možen odvzem v določenem prečnem prerezu s , ki že vključuje Q_{es} , ki se določi v deležu sQ_s . Za območje Slovenije, kjer se v skladu s predpisi Q_{es} določa v odvisnosti od več različnih parametrov (Uredba, 2009) je učinkovito, če se Q_{es} odšteje že od statističnega letnega hidrograma, ter dejansko določi »razpoložljivi« srednji letni pretok. Primer določitve razpoložljivega pretoka je prikazan na Sliki 4, kjer je bila interpolacija sQ_s vzdolž analiziranega vodotoka izvedena na podlagi statističnih podatkov dveh obstoječih vodomernih postaj, razpoložljivi pretok pa je bi določen z odštetjem predpisane količine Q_{es} (upoštevano je povprečje za suho in mokro obdobje) in odštetjem obstoječe rabe (dve zaporedni mali hidroelektrarni). Izraziti skoki v liniji sQ_s vzdolž stacionaže predstavljajo točke, v katerih se v analizirani vodotok izlivajo pritoki. Večji ko je skok v liniji, večja je prispevna površina oziroma dotok vode iz podpodrečja. Na sliki so prikazana tudi območja s prispevno površino manjšo od 100

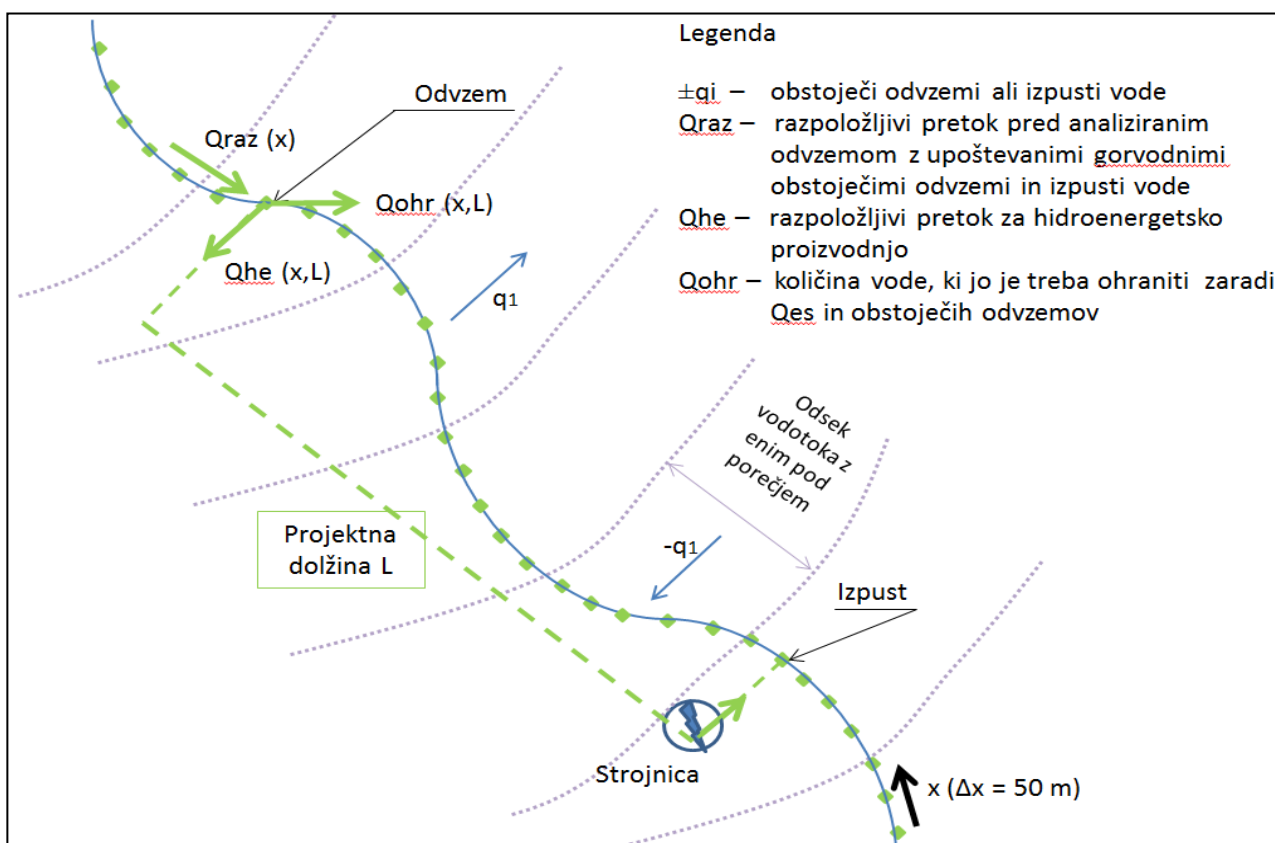
km² in manjšo od 10 km². Ta podatek je namreč potreben pri določitvi vrednosti Q_{es} v skladu s

predpisi, ki zahtevajo upoštevanje velikosti prispevne površine do mesta odvzema vode.



Slika 2: Računsko interpolacijski postopek določitve razpoložljivega pretoka v prečnih prerezih vzdolž analiziranega vodotoka.

Figure 2: Calculation interpolation procedure for determining available flow at cross-sections along the analysed river.

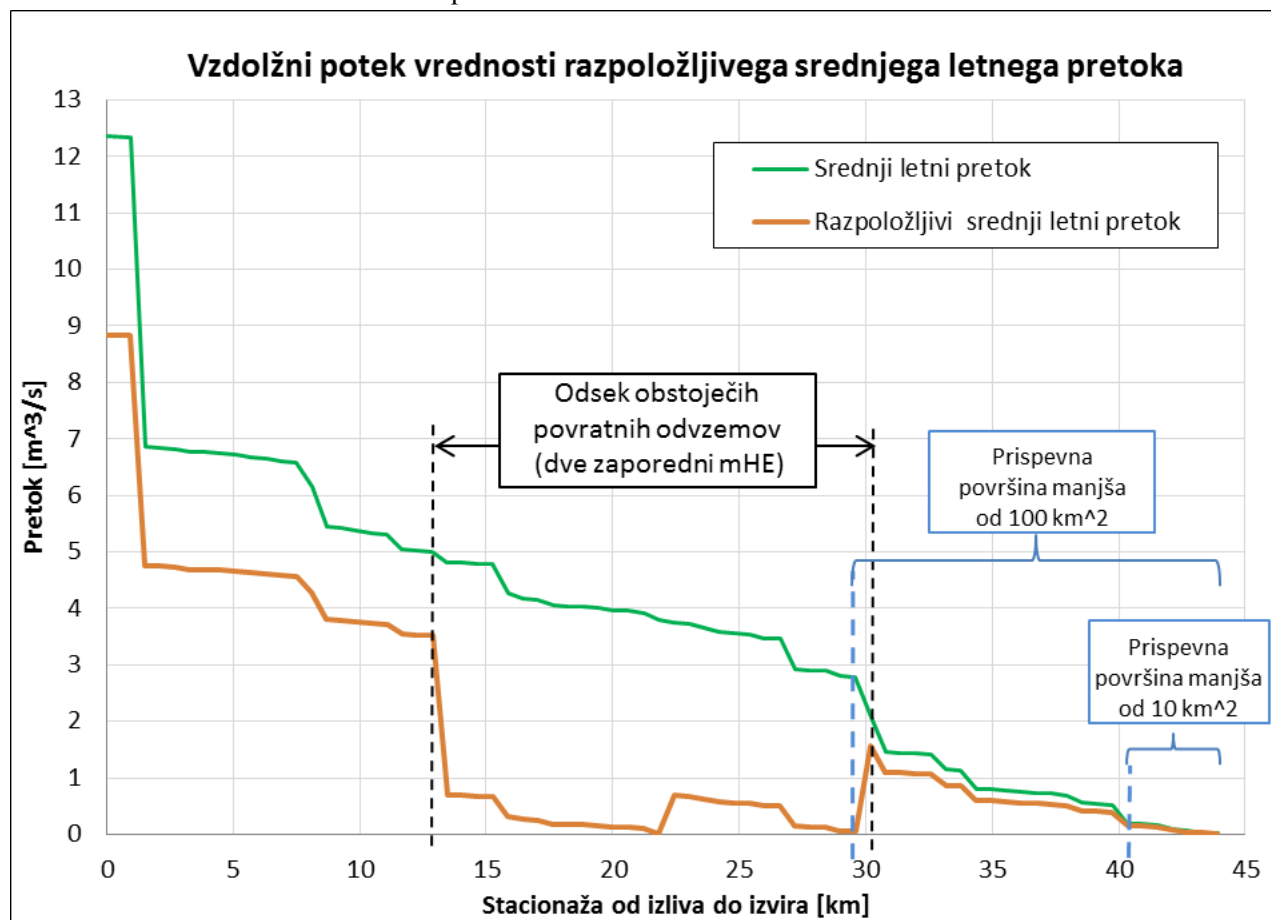


Slika 3: Shematski prikaz določitve podporečij in razpoložljivega pretoka za hidroenergetsko rabo vode z upoštevanjem izbrane dolžine derivacije.

Figure 3: Schematic presentation of the determination of sub-tributaries and available flow for hydropower water use with regard to the selected length of derivation.

Kot zadnji korak prve faze za ugotovitev razpoložljivega tehničnega potenciala je treba določiti še osnovne hidravlične parametre in

opredeliti izkoristke. Postopek je predstavljen v naslednjem podpoglavju.



Slika 4: Primer določitve vzdolžnega poteka sQs in določitve razpoložljivega pretoka z upoštevanjem obstoječe rabe in Qes .

Figure 4: Example of Q_{mean} determination along a river stretch and available Q_{mean} determination with regard to existing water use and Environmental Flow.

2.3 Določitev izkoristkov in hidravličnih parametrov

Za izračun tehničnega potenciala v točkah analiziranega odseka, ki v osnovi temelji na razpoložljivem pretoku v točki x z analizirano dolžino L (Slika 3), je potrebno določiti tudi bistvene parametre izkoristkov pri pretvorbi potencialne energije in proizvodnji električne energije. V orodju VapIdroAste so vgrajene splošno privzete enačbe. Enačba za izračun količine proizvedene energije E v točki x s predvideno dolžino je:

$$E(x, L) = \eta_0 \cdot 9,81 \cdot H_n \cdot Q_{HE}(x, L) \cdot 8760 \cdot C_{ut}, \quad (2)$$

kjer so H_n neto razpoložljivi padec, η_0 skupni izkoristek (izgube v tlačnem cevovodu, izkoristek

turbinsko generatorske opreme, izgube pri prenosu v električno omrežje) in C_{ut} koeficient obratovanja v letu. S koeficientom C_{ut} se upošteva neobratovanje zaradi izpadov, vzdrževanja ipd.

Moč hidroelektrarne (P) je izračunana po formuli:

$$P(x, L) = \eta_t \cdot 9,81 \cdot H_n \cdot Q_{HE}(x, L) \cdot k_{hp}, \quad (3)$$

kjer je η_t izkoristek turbine, H_n neto razpoložljivi padec in k_{hp} faktor inštalacije moči (razmerje med $Q_{instalirani}$ in sQs), ki je odvisen od krivulje trajanja pretoka analiziranega rečnega odseka.

H_n je določen na podlagi naslednje enačbe:

$$H_n = H_{bruto} - \Delta H, \quad (4)$$

kjer je H_{bruto} bruto padec v izbrani projektni

dolžini L , ΔH pa so energijske izgube v dovodnem kanalu in tlačnem cevovodu hidroenergetskega objekta. ΔH se lahko izračuna po več metodah (Alterach et al., 2008c):

- enostavna metoda, ki upošteva izgube samo zaradi padca dna dovodnega kanala,
- alimimetrična metoda in
- hidravlična metoda.

Naslednja enačba prikazuje določitev ΔH po hidravlični metodi, pri čemer je izhodišče projektna dolžina derivacije L , ki je s faktorjem R razdeljena na dolžino dovodnega kanala in dolžino tlačnega cevovoda. Energijske izgube (ΔH) so tako določene kot:

$$\Delta H = i \cdot (1 - R) \cdot L + R \cdot L \cdot \frac{Q_{HE}(x, L)^2}{K_s^2 \cdot D^{\frac{16}{3}}} \cdot \frac{2^{\frac{20}{3}}}{\pi^2} + \alpha \cdot \frac{Q_{HE}(x, L)^2 \cdot 8}{D^4 \cdot g \cdot \pi^2}, \quad (5)$$

kjer so i padec derivacijskega kanala, R razmerje med dolžino tlačnega cevovoda in dovodnega kanala, Q_{HE} pretok hidroelektrarne, D premer tlačnega cevovoda, α splošni koeficient lokalnih izgub v cevovodu in K_s koeficient hrapavosti po Stricklerju (Steinman, 2010). Uporabljena metoda izhaja iz predpostavk, da so izgube (energijska črta) v dovodnem derivacijskem kanalu vzporedne padcu dna kanala in da se v tlačnem cevovodu pojavi turbulentni režim toka vode. Če analiziramo tip derivacije, ki ima ves dovod vode od zajema do strojnice v tlačnem režimu, je razmerje R enako 1, kar pomeni, da je prvi člen enačbe 5 enak 0.

Opisana teoretična izhodišča, ki so bila podana v tem poglavju, in so vključena v orodje VapIdroAste, so podlaga za izvedbo prve faze določanja tehnično razpoložljivega potenciala. Verifikacija rezultatov pridobljenih z orodjem VapIdroAste na območju Slovenije je potekala na podlagi obstoječih podatkov o hidroenergetski izrabi in lokacijah obstoječih hidroenergetskih objektov na primeru reke Oplotnice (Skroza, 2011; Šantl, 2011).

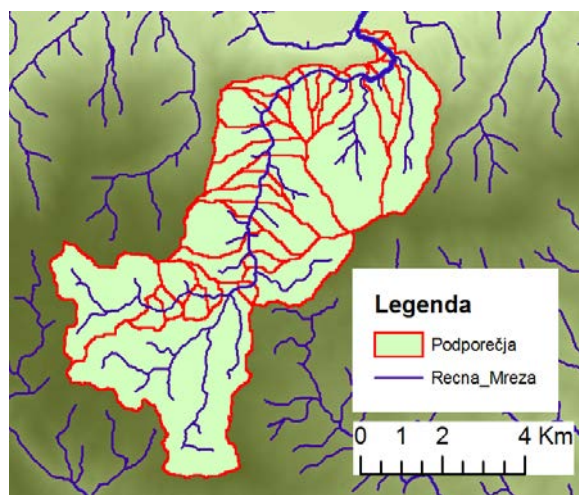
V naslednjem poglavju je prikazan aplikativni primer, na katerem smo testirali orodje

VapIdroAste in podajali pripombe pri razvoju in odpravi napak.

3. Aplikativni primer – porečje Lobnice

Kot podpora razvoju orodja VapIdroAste sta bili izbrani dve testni porečji, porečje Oplotnice in porečje Lobnice. V začetni fazi smo pridobili podatke o DMT (uporabljen je bil uradno dostopni podatek DMT 12,5m) in statistične podatke o pretokih vode z obstoječih vodomernih postaj. V nadaljevanju prikazujemo rezultate analize na reki Lobnici, rezultati na reki Oplotnici so bili že podrobneje predstavljeni (Šantl, 2011).

Pri vzpostavitvi rečne mreže in podporečij je bila vzpostavljena rečna mreža do velikosti povirja 0.3125 km² in izbrano število podporečij v višini 30 (Slika 5).



Slika 5: Vzpostavljena rečna mreža s pritoki in podporečja za porečje Lobnice.

Figure 5: Established river network with tributaries and sub-basins of Lobnica river basin.

Pri preverjanju ujemanja z uradnimi podatki ni prišlo do vplivnejših grobih napak (napačen potek struge, izrazito odstopanje v mejah porečja). Do večjega odstopanja je prišlo v dolvodnem izlivnem območju, kjer smo ugotovili, da so bili uradni podatki nepravilni. Glede na uradne podatke (Atlas okolja, ARSO) se namreč struga Lobnice v izlivnem delu razcepi na dve strugi, ki se neodvisno izlivata v reko Dravo. Pri tem pa uradni podatek o meji porečja ni zaključen v izlivu Lobnice, ampak v drugem izlivu, ki pa je danes

označen kot vodotok brez imena in glede na pregled prostorskih podatkov ne obstaja več.

Slika 6 prikazuje izračun razpoložljivega pretoka vzdolž Lobnice, ki je bil določen na podlagi dveh vodomernih postaj. Na primeru Lobnice ni bilo bistvenih obstoječih odvzemov vode, oziroma so že zajeti s statističnimi hidrološkimi podatki na vodomernih postajah VP Šumik in VP Ruše. Pri določitvi razpoložljivega pretoka ni bil vnesen podatek o Q_{es} , saj smo želeli določiti celoten tehnični potencial in ne razpoložljivega tehničnega potenciala.

Na Sliki 6 so podani tudi izkoristki in hidravlični parametri, ki se upoštevajo pri analizi tehničnega potenciala. Izkoristki so izbrani v skladu z zadnjim znanim stanjem tehnike pri doseganju učinkovitosti pri pretvorbi potencialne energije vode v električno energijo. Kot primer preglednica 1 prikazuje rezultate izkoristkov naprav in opreme nove hidroelektrarne pri različnih obratovalnih obremenitvah (Prabhakar, 2007).

Preglednica 1: *Učinkovitost turbinsko generatorske opreme pri različnih obremenitvah (Prabhakar, 2007).*

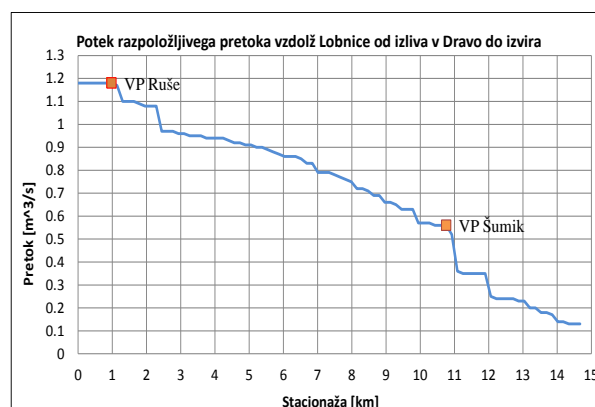
Table 1: *Efficiency of turbo generator equipment at different loads (Prabhakar, 2007).*

	Učinkovitost generatorja	Učinkovitost turbine	Skupna učinkovitost
Polna obremenitev (11,4 MW)	96.45%	89.40%	86.23%
¾ obremenitve (~ 7,6 MW)	97.45%	91.30%	88.97%
½ obremenitve (~ 5,1 MW)	97.30%	91.20%	88.74%
¼ obremenitve (~ 2,5 MW)	93.50%	87.20%	81.53%

Upoštevani skupni izkoristek $\eta_0 = 80\%$ je nekoliko nižji, saj so pri analizi proizvodnje električne energije upoštevane tudi izgube pri prenosu v električno omrežje. Glede na zadnje stanje tehnike bi moral biti izkoristek transformatorja višji od 95 % (Kuphaldt, 2012). Faktor instalacije moči k_{hp} je

bil določen na podlagi krivulje trajanja pretoka za reko Lobnico in to s količnikom $k_{hp} = Q_{15\%}/Q_{50\%}$, s katerima se določa vrednost pretoka, ki presega 15% dni v letu oziroma 50% dni v letu, kar je primerno za neakumulacijske tipe hidroelektrarn (Alterach, 2008c). Za ugotavljanje potenciala je pomembnejši podatek o oceni letne proizvodnje energije, vendar je instalirana moč neposreden podatek za izračun investicijskih stroškov in optimizacijo investicije.

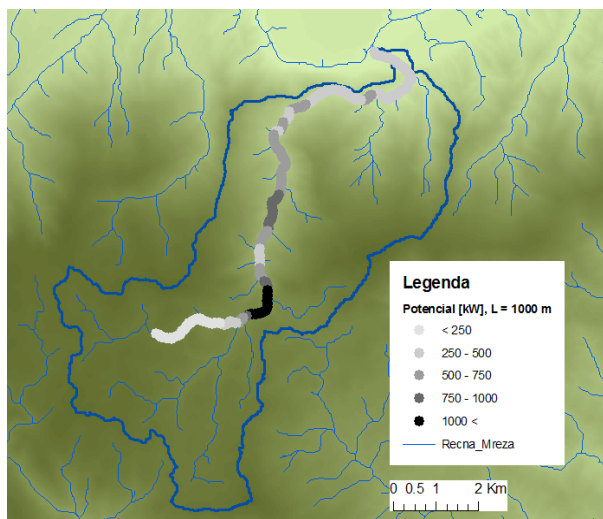
Faktor R je določen z vrednostjo 1, kar pomeni da je pri derivaciji vode od zajetja do strojnice predvidena tehnična izvedba tlačnega cevovoda v celotni dolžini L .



Uporabljene enačbe in vrednosti za izračun razpoložljivega tehničnega potenciala:	
Energija: $E = \eta_0 * 9,81 * H_n * Q_{sr} * 8760 * \text{Cut}$	
η_0 - skupni izkoristek	80%
Cut - koeficient 'uporabe'	95%
Moč: $P = \eta_t * 9,81 * H_n * Q_{max} * k_{hp}$	
η_t - Izkoristek turbine	90%
k_{hp} - faktor instalacije moči	1.3
H_n - neto razpoložljivi padec, odvisen od:	
Maksimalna hitrost vode v cevovodu	1.8 m/s
Koeficient dolžinskih izgub	0.001
Koeficient lokalnih izgub v cevovodu	0.5
Stricklerjev koeficient hrapavosti	90

Slika 6: *Izračun razpoložljivega pretoka vzdolž Lobnice od izliva v Dravo do izvira in določitev izkoristkov in hidravličnih parametrov.*

Figure 6: *Calculation of available flow along river stations of Lobnica from the mouth to the spring and determination of efficiencies and hydraulic parameters.*

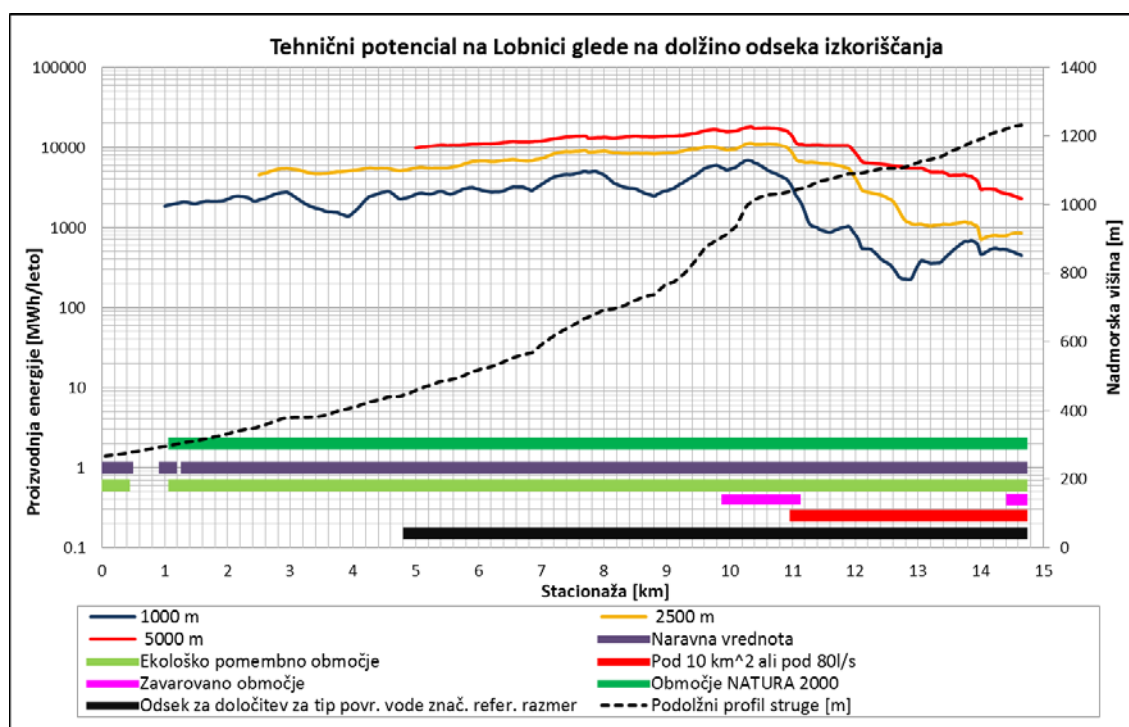


Slika 7: Prikaz tehničnega potenciala izraženega z instalirano močjo [kW] na Lobnici v primeru analize z izbrano projektno dolžino $L = 1000$ m.

Figure 7: Presentation of technical potential expressed as installed power [kW] on Lobnica river in the case of the derivation design length $L = 1000$ m.

Rezultati analize so prikazani na slikah 7 in 8. Slika 7 prikazuje tehnični potencial vzdolž reke Lobnice, tako da je v vsaki točki ($\Delta x = 50$ m) določena vrednost instalirane moči [kW] s predpostavko, da je v tej točki določen odvzem, izpust pa se nahaja 1000 m dolvodno, torej je izbrana projektna dolžina $L = 1000$ m. Največji tehnični potencial je določen z vrednostjo okoli 1100 kW instalirane moči.

Slika 8, ki je bila izrisana zaradi dosedanje prakse pri načinu podajanja podatkov in rezultatov v vzdolžnem prerezu struge, pa prikazuje vzdolžni potek (stacionaža Lobnice poteka od izliva do izvira s podolžnim profilom struge) tehničnega potenciala izraženega z letno proizvodnjo elektrike [MWh/leto] pri različnih projektnih dolžinah ($L = 1000$ m, 2500 m in 5000 m). Reka Lobnica je bila v sklopu projekta SEE-H izbrana kot pilotni projekt tudi zaradi izredne gostote veljavnih okoljskih in naravovarstvenih režimov, ki so



Slika 8: Prikaz tehničnega potenciala izraženega z letno proizvodnjo elektrike [MWh/leto] vzdolž reke Lobnice z vzdolžnim profilom struge pri različnih projektnih dolžinah L in prekrivanje z okoljskimi in naravovarstvenimi pravnimi režimi.

Figure 8: Presentation of technical potential expressed as annual electricity production [MWh/year] at different derivation design lengths L , the general profile of the river bed along river stations and overlap with environmental and nature preservation legal regimes along river stations of river Lobnica.

vzpostavljeni na njej. Veljavni režimi so v stacionaži tudi prikazani na Sliki 8.

Ker je s programom VapIdroAste mogoče izvesti tudi drugo fazo analize, to je določitev ekonomsko upravičenega potenciala, so bili pripravljeni in vneseni dodatni vhodni podatki. Ti podatki zajemajo določitev investicijskih krivulj za izvedbo objektov in določitev stroškov (višina koncesnine, obratovanje in vzdrževanje) in prihodkov (finančne podpore za proizvodnjo električne energije iz malih hidroelektrarn). Investicijske krivulje za posamezne glavne objekte so bile funkcijsko vezane na merodajne parametre (velikost prispevnega območja, premer cevi in moč strojnice), umerjene in verificirane pa na podlagi znanih primerljivih investicij v hidroenergetsko rabo vode (Skoza, 2011; Šantl, 2011).

Slika 9 in Preglednica 2 prikazujeta rezultat optimizacijskega postopka določanja lokacij odvzemov in izpustov iz vidika doseganja največje pozitivne vrednosti ekonomskega indikatorja »razmerje koristi/stroški«. Razvidno je, da je na Lobnici ekonomsko upravičen potencial, v primeru izkoriščanja vse vode (tehnični potencial) in ob upoštevanju trenutnih podpor (~ 92 EUR/MWh) za male hidroelektrarne, približno 6400 kW tehničnega potenciala, ki je tudi ekonomsko upravičen. Vsak razvoj modela zahteva izvedbo postopka, ki na različnih nivojih zajema umerjanje (ang. calibration), preverjanje (ang. verification) in potrditve (ang. validation) (Šantl in Steinman, 2009). Na ta način zagotovimo ovrednotenje stopnje zaupanja v rezultate. Razvit in v članku predstavljen model je bil preverjen in ovrednoten na konkretnih primerih s primerjavo z nekaterimi obstoječimi pobudami za podelitev koncesij za hidroenergetsko rabo vode in že izvedenimi študijami (Šantl, 2011; Skoza 2011; Univerza v Lj., 2011). Natančnost rezultatov, ki so izračunani na podlagi investicijskih krivulj orodja VapIdroAste, ni zadostna podlaga za odločanje o končnih lokacijah hidroenergetskih objektov, saj je za to treba upoštevati dodatne parametre za optimalno določitev hidroenergetske sheme na določenem izbranem vodotoku (krivulja trajanja pretoka, lokacije obstoječe infrastrukture, dostopnost, geomorfološke značilnosti

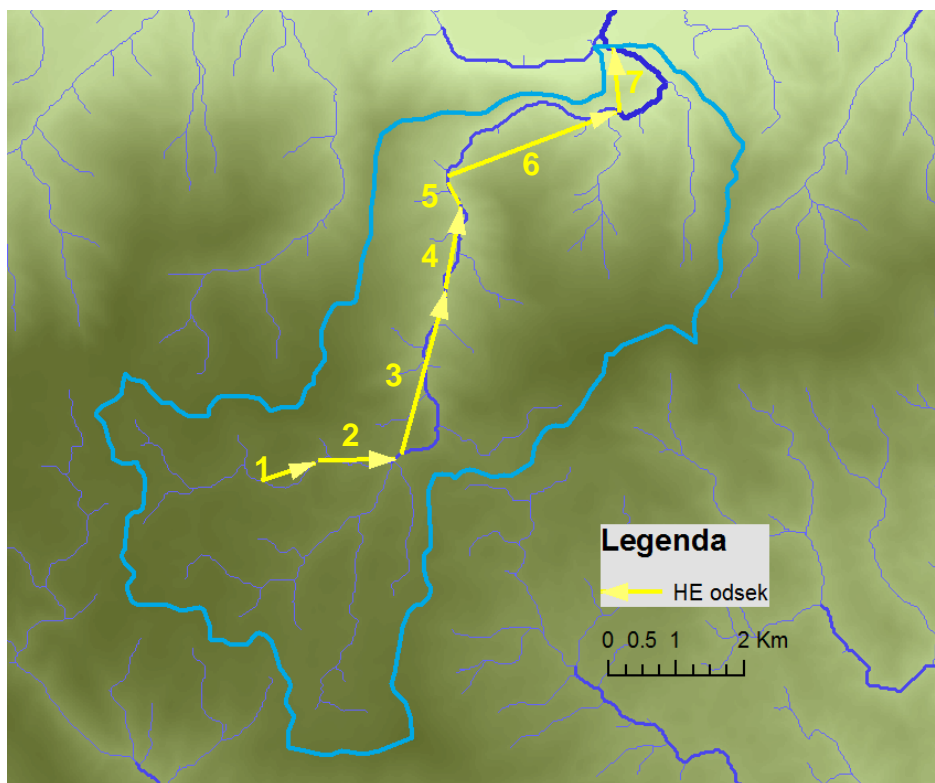
mikrolokacij, lastništvo zemljišč, strateške usmeritve, pogoji in omejitve zaradi veljavnih režimov idr.). So pa razvito orodje in pridobljeni rezultati dovolj natančna podlaga za oceno tehničnega in razpoložljivega tehničnega potenciala vzdolž izbranega vodotoka ter za oceno celotnega potenciala določenega vodotoka, kar je želen podatek zlasti pri podpori strateškemu odločanju (pregled potenciala, analiza prekrivanja z drugimi strateškimi dokumenti, npr. z Načrtom upravljanja voda; ena od podlag za izdelavo Energetskega programa) in ustrezno izhodišče za fazo izdelave idejne zasnove in dokumenta identifikacije investicijskega projekta, ki sta med drugim podlaga za odločitev za začetek postopka prostorskega načrtovanja.

4. Zaključki

V sklopu projekta SEE Hydropower je bilo orodje VapIdroAste teoretično in aplikativno dodatno razvito in dopolnjeno. Bistvene dopolnitve upoštevajo vključevanje DMT večje natančnosti, upoštevaje večjega števila možnih dolžin projektnih derivacij ter usklajevanje stacionaž rezultatov, ki se shranjujejo in prikazujejo prostorsko, z rezultati, ki se prikazujejo in shranjujejo tabelarično. V začetnih fazah je bila pozornost namenjena tudi vključitvi določanja Qes v skladu s slovenskimi predpisi, vendar smo v času projekta ugotovili, da je zaradi vključevanja vseh parametrov, ki jih je treba upoštevati pri izračunu Qes vzdolž analiziranega vodotoka, določanje Qes zelo kompleksno (Uredba, 2009). Zato smo se odločili, da Qes v izračunih upoštevamo v odstotkih ali tako, da od sQs odštejemo Qes ter da tako dobljeni razpoložljivi sQs upoštevamo v analizi razpoložljivega hidroenergetskega potenciala. Tudi izdelava uporabniškega vmesnika je predstavljala zahtevno testno delo, ki je vključevalo razvoj novih programskih rešitev (uporabnost v zadnjih verzijah ArcMap programov) in odpravljanje napak (ang. bugs). Pri uporabi orodja je treba upoštevati, da je v začetnih fazah pomembna natančna preveritev in verifikacija vhodnih podatkov in jasno podane obrazložitve, kakšen tip hidroenergetskega potenciala želimo ugotoviti (bruto, tehnični ali

razpoložljivi potencial). Prav tako je treba ugotoviti obstoječo rabo vode in upoštevati zahteve

po ohranjanju Q_{es} oziroma druge omejitve za rabo vode.



Slika 9: Prikaz rezultata postopka optimizacije za določitev lokacij hidroenergetskih odsekov derivacij vzdolž Lobnice z oštevilčenjem odsekov (glej Preglednica 2).

Figure 9: Presentation of results of the optimisation process of determining the locations of derivation sections along river Lobnica with numbering (see Table 2).

Preglednica 2: Prikaz rezultata optimizacije lokacij hidroenergetskih odsekov derivacij (glej Slika 9) s podajo bistvenih parametrov.

Table 2: Presentation of results of the optimisation process of determining the locations of derivation sections (see Figure 9) with basic parameters.

Zap. št.	Bruto padec [m]	Dolžina rečnega odseka derivacije [m]	Srednji pretok na odvzemu [m ³ /s]	Instalirana moč [kW]	Proizvodnja el. energije [MWh/leto]
1	69	1050	0.27	213	1214
2	91	1350	0.30	315	1792
3	380	3100	0.51	2223	12666
4	130	1450	0.76	1137	6474
5	22	400	0.86	220	1251
6	147	3300	0.88	1484	8455
7	68	2000	1.07	839	4777

Predstavljen teoretični in aplikativni pristop k določanju hidroenergetskega potenciala na podlagi informacijsko avtomatizacijskih postopkov in orodij, ki temeljijo na geografskih informacijskih sistemih, je razvit do mere, ko je uporaben za nivo strateškega odločanja (npr. podpora pripravi Nacionalnega energetskega programa ipd.), predvsem za določanje odsekov vodotokov, ki so primerni za hidroenergetsko rabo z vidika potenciala in okvirno oceno predvidene proizvedene energije. Za podrobnejše določanje lokacij odvzemnih, derivacijskih in izpustnih objektov je orodje primerno za nivo idejne zasnove, torej faze pred natančnejšim prostorskim umeščanjem objektov v prostor ter podrobnejšim načrtovanjem objektov in naprav.

Praviloma se natančnost določanja lokacij posameznih hidroenergetskih objektov poveča s pripravo natančnejših vhodnih podatkov, vendar je končna odločitev o lokacijah objektov vezana tudi na druge vplivne parametre pri odločanju, ki niso samo tehnične, ampak tudi okoljske, infrastrukturne in družbeno-socialne narave.

Viri

Alterach, J., Peviani, M., Davitti, A., Vergata, M., Ciaccia G., Fontini F. (2008a). Strategies to promote small scale hydro electricity production. Conference HIDROENERGIA 2008, 11-13 Junij, Bled, Slovenia <http://www.zdmhe.si/en/conference-conclusions/day-1.html> (Pridobljeno 2. 3. 2012.)

Alterach J., Peviani M., Elli, A., Davitti A.. (2008b). A GIS integrated tool to evaluate the residual potential hydropower production at watercourse scale. 13th IWRA World Water Congress 2008, 1-4 September, Montpellier, France.

http://www.iwra.org/congress/2008/index.php?page=proceedings&abstract_id=928 (Pridobljeno 2. 3. 2012.)

Alterach, J., Davitti A., Peviani M. (ERSE). (2008c). SMART MINI IDRO – strumento informatico per la valutazione della fattibilità tecnico-economica di impianti mini idroelettrici ad acqua fluente. Report for CESIRICERCA, Prot. 08001047 (29. 02. 2008.)

Maidment, D. R. (2002). *Archydro: Gis for Water Resources*. ESRI, New York, 203 p.

Evropska komisija (2002). *Priročnik za izdelavo analize stroškov in koristi investicijskih projektov*. Založnik: Služba vlade RS za strukturno politiko in regionalni razvoj - 2004. 153 p.

Kuphaldt, T. R. (2012). Lessons In Electric Circuits, Volume II, Chapter 9, TRANSFORMERS. http://openbookproject.net/electricCircuits/AC/AC_9.html#xtocid711517 (Pridobljeno 4. 5. 2012.)

Prabhakar, B., Pathariya, G. K.. (2007). Recent Renovation and Modernization Technologies for Existing Hydro Turbine. International Conference on Small Hydropower - Hydro Sri Lanka, Kandy, Sri Lanka, 22-24 October 2007, 161–168.

Rak, G., Šantl, S., Müller, M., Steinman, F., Novak, G. (2010). Hydraulic modeling of future hydro power plants on lower Sava. Dam safety - sustainability in a changing environment: Proceedings of the 8th ICOLD European Club Symposium, Graz, Austria, 133–138.

Skroza, A. (2011): Ovrednotenje hidroenergetskega potenciala ob upoštevanju okoljskih ciljev na pohorskih vodotokih (Evaluation of hydropower potential in Pohorje streams considering environmental objectives) Graduation thesis. Univerza v Ljubljani, FG, 77 p. (in Slovenian).

Steinman, F. (2010). *Hidravlika*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: 294 p.

Šantl, S. (2011). Razvoj pristopov in orodij za podporo učinkovitemu načrtovanju hidroenergetske rabe voda. *Gradbeni vestnik* **60**, 7: 178–184. (in Slovenian).

Šantl, S., Steinman, F. (2009). Postopek makrokalibracije hidravličnega modela vodooskrbnih sistemov (Macrocalibration in the process of hydraulic modelling of water supply systems). *Gradbeni vestnik* **58**, 8: 194–203. (in Slovenian).

Tarboton, D. G., Bras, R. L., Rodriguez-Iturbe, I. (1991). On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. *Hydrologic Processes*, **5**(1): 81–100.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem (KMTe) (2011). Preučitev hidroenergetskega potenciala za reko Mežo – I. faza. Naročnik: VGB Maribor d.o.o.

Uredba o kriterijih za določitev ter načinu spremljanja in poročanja ekološko sprejemljivega pretoka (2009). Uradni list št. 97/2009.